



УДК 630*61

СИСТЕМА МОДЕЛЕЙ РОСТА И ДИНАМИКИ ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСОВ РОССИИ

(таблицы и модели биопродуктивности)

А. З. ШВИДЕНКО (Международный институт прикладного системного анализа); **Д. Г. ЩЕПАЩЕНКО** (МГУЛ); **С. НИЛЬССОН** (Международный институт прикладного системного анализа); **Ю. И. БУЛУЙ** (МГУЛ)

Экологизация, понимаемая как расширение теоретического, понятийного и модельного аппарата лесной таксации в отношении экологических функций лесов, является одной из важнейших задач современного этапа развития этой лесной науки. В частности, предполагаемая в будущем оценка углеродного бюджета лесов для каждого таксационного выдела (что следует из логики практических приложений протокола Киото) обуславливает необходимость таксации фитомассы, чистой первичной продукции и ряда других показателей лесных экосистем, ранее не определявшихся системой учета лесов России. Отсюда следует целесообразность разработки новых типов лесотаксационных нормативов, важнейшая разновидность которых — модели и таблицы биологической продуктивности лесных экосистем (МБП).

Назначение нормативов этого типа — представить нормативно-справочную информацию для оценки динамики фитомассы по фракциям, приростов по фитомассе и, следовательно, чистой первичной продукции (Net Primary Production, NPP) и чистой экосистемной продукции (Net Ecosystem Production, NEP) лесов. Разработка подобных нормативов раньше не осуществлялась, поэтому необходимо четко определить первоочередные методические и модельные задачи.

В настоящей работе рассмотрена методика, приведены основные промежуточные модели и примеры МБП насаждений основных лесобразующих пород России в рамках системы, разработанной Международным институтом прикладного системного анализа при участии российских научных институтов. Для того чтобы использовать накопленные знания о росте и продуктивности древостоев и иметь МБП, совместимые с действующими нормативами, логично применить существующую нормативно-справочную базу, т. е. таблицы хода роста (ТХР). В данном исследовании использована унифицированная система таблиц, описанная в предыдущей работе [4]. Структура системы и классификация МБП приняты аналогичными структуре системы ТХР, т. е. МБП составлены для всех таблиц хода роста (полных и модальных, общих и региональных), включенных в систему.

Переход от ТХР к МБП не тривиален и требует системного рассмотрения методики моделирования фитомассы и ее динамики. Фитомасса представляет собой живое растительное вещество экосистем (древесина живых деревьев, содержащая живые и мертвые клетки, как и кора, относится к фитомассе в целом). По аналогии с известными таксационными показателями древостоев определим *наличную массу фитомассы* в возрасте A (F_A) как ее максимальное количество, достигаемое экосистемой за вегетационный период года A , и *общую продуктивность экосистемы по фитомассе в возрасте A* (TPF_A) как накопленную величину всей произведенной фитомассы за период существования насаждения. Оба показателя определяются в единицах массы на единицу площади, в сухом органическом веществе или углеводе, например $kg\ C/m^2$ или $Mg\ (10^6\ g = 1\ t)\ C/ga$. Очевидно, годичный текущий прирост по общей продуктивности фитомассы GGF_A дает NPP_A (определяемую как масса органического вещества, произведенного экосистемой за единицу времени, в нашем рассмотрении — год), а годичный прирост по наличной массе фитомассы NGF_A — часть чистой экосистемной продукции, обусловленной растительностью NEP_A (чистая экосистемная продукция определяется как общее изменение органического вещества в экосистеме, но в данной работе не рассматривается органическое вещество почвы), т. е.

$$GGF_A = NPP_A = TPF_A - TPF_{A-1} \quad (1)$$

$$NGF_A = NEP_A = F_A - F_{A-1} \quad (2)$$

Значения NPP_A и NEP_A изменяются несущественно, если рассматривать их величину как разность соответствующих показателей на начало и конец года A , однако количество фитомассы будет занижено на величину годичной продукции зеленых частей, отмирающих или использованных в течение вегетационного периода. Производные функций, описывающих изменение чистой первичной

и чистой экосистемной продукции, в зависимости от возраста дают «точечное» значение NPP_A и NEP_A для данного года.

Разработка моделей фитомассы. Фитомасса не относится к биометрическим характеристикам, измеряемым непосредственно в лесу, а вычисляется по моделям. Подходы, применявшиеся для этой цели два последних десятилетия, сходны. Как правило, моделируется отношение R массы отдельных фракций фитомассы F к запасу древостоя GS как функция таксационных показателей T_j , определяемых при лесочетных работах, т. е.

$$R^i = F^i / GS = f(T_j) \quad (3)$$

Зная запас древостоя (определенный независимо от R^i , например, при лесоустройстве), можно рассчитать фитомассу фракций по уравнению (3). Для разработки моделей R^i используются, как правило, два подхода. В. А. Усольцев [1, 2], стремясь максимизировать статистические показатели точности аппроксимации R^i , применил громоздкие конструкции аллометрического типа, вводя в регрессионные уравнения в различных сочетаниях возраст (A), средние высоту и диаметр древостоев (H , D), среднюю высоту в 100-летнем возрасте (H_{100}) и число деревьев (N). Представители второго направления разрабатывали модели для оценки фитомассы лесов на больших территориях, например для страны в целом [3]. Входами в них служат показатели из обобщенных данных государственного учета лесного фонда, т. е. возраст, класс бонитета (SI) и полнота (RS) по преобладающим породам. Назначение двух названных типов моделей различно: первые более подходят для оценки фитомассы отдельного древостоя, вторые — для совокупности древостоев (для которых, например, средний диаметр и особенно среднее число стволов можно определить только экспертным путем). По этой же причине модели второго типа наиболее приемлемы для разработки МБП.

Исследования показали, что применение отношения в виде уравнения (3) более обоснованно и обеспечивает в практических приложениях более высокую точность, чем использование отношения M^i к массе стволовой древесины. Последняя включает дополнительную ошибку, связанную с тем, что условная плотность стволовой древесины, необходимая для перехода от запаса к массе, зависит от географического района и местных условий произрастания. Вторым методический вывод состоит в том, что использование запаса как входа в модели (т. е. непосредственное применение аллометрии) не способствует повышению точности практического оценивания фитомассы, принимая во внимание некоторые специфические черты системы учета лесов в России [3].

Для оценивания R^i создана база данных, включающая около 3,5 тыс. пробных площадей, на которых производилось непосредственное определение фракций фитомассы и измерялись таксационные показатели древостоев [3]. В целях выбора «лучшей» аналитической формы для параметризации уравнения (3) испытывалось восемь различных нелинейных уравнений. Из них для сравнительного отобраны два:

$$R_i = c_0 SI^c c_1 A^c (C_2 + C_3 RS + C_4 RS^2) \quad (4)$$

$$R_i = c_0 A^c SI^c RS^c \exp(C_4 A + C_5 RS), \quad (5)$$

где SI — класс бонитета (кодировался как 3, 4, ..., 13 для Ic, Ib, \dots, Vb классов соответственно); A — возраст; RS — относительная полнота; c_1, \dots, c_5 — регрессионные коэффициенты.

Основанием для выбора того или иного типа уравнений служили показатели статистической точности аппроксимации и адекватности (в частности, зависящей от монотонности изменения R^i по переменным), проверяемые стандартным путем. В целом точность и адекватность моделей (4) и (5) в большинстве случаев оказались близкими.

Применение класса бонитета в уравнениях встречает иногда критику со стороны ряда специалистов, утверждающих, что он является порядковой, а не арифметической величиной. Однако исходя из того, что качество условий местопроизрастания, отраженное в классификации по бонитетам, есть величина непрерывная и отменяя тесную связь ($r > 0,99$) бонитета со средней высотой 100-летнего древостоя, использование кодированных значений

класса бонитета столь же правомерно, как и средней высоты в 100 лет.

В табл. 1 приведены коэффициенты агрегированных уравнений для вычисления фитомассы древостоев общих МБП. В тех случаях, когда экспериментального материала было достаточно, разрабатывались также модели для объединенных экорегионов и лесорастительных зон. Эта часть уравнений из-за громоздкости здесь не приводится. Заметим, что региональные модели имели, как правило, более высокие статистические показатели точности аппроксимации по сравнению с общими, что объясняется большей однородностью объекта моделирования.

Данные табл. 1 содержат обширный материал для анализа. Отметим только несколько наиболее важных методических результатов:

приведенные уравнения адекватны как по независимым переменным, так и по отклику;

уравнения и регрессионные коэффициенты статистически значимы при вероятности 0,95; случаи с незначимыми коэффициентами составляли около 10 %, однако унифицированная форма уравнений была сохранена;

использование многомерных зависимостей позволяет извлечь максимум информации из экспериментальных данных и по возможности учесть зональные особенности экосистем, в том числе и для общих МБП;

условная плотность стволовой древесины (R^i для стволовой фитомассы) существенно зависит от пород и условий местопроизрастания.

Использованный модельный аппарат малопригоден для оценки фитомассы нижних ярусов экосистемы (подроста, подлеска и живого напочвенного покрова), поскольку на эти показатели в

большей мере влияют типологические особенности лесов, чем таксационные признаки насаждений. Но, учитывая, что сводные материалы по типам леса в агрегированных данных ГУЛФ страны не приводятся и что фитомасса нижних ярусов составляет, как правило, незначительную величину (до нескольких процентов от общего количества фитомассы), уравнения (4) и (5) сохранены и для этой цели. Однако моделировано не R , а непосредственно масса фракций. Это дало лучшие результаты, так как масса нижних ярусов леса слабо зависит от запаса насаждения, хотя типологические особенности находят отражение в полноте и классе бонитета древостоя. В табл. 2 приведены коэффициенты уравнений для нижних ярусов и, несмотря на приближенность подхода, все уравнения статистически значимы.

Разработка моделей биопроductивности. Определяющую роль в моделях биологической продуктивности играют два показателя — динамика наличной массы фитомассы и динамика фитомассы по общей продуктивности.

Расчет динамики наличной массы фитомассы прост: имея модели отношения фитомассы R^i и соответствующие таксационные показатели ТХР, можно вычислить массу отдельной фракции для каждого возраста, умножив R^i на табличный запас GS.

Общая продуктивность экосистемы по фитомассе TPF_A к моменту времени A определяется как

$$TPF_A = TPF_A^{st} + TPF_A^{br} + TPF_A^{fol} + TPF_A^{root} + TPF_A^{under} + TPF_A^{gff}, \quad (6)$$

где верхние индексы обозначают фракции фитомассы: st — ствол, br — скелет кроны (оба показателя в коре), fol — листья и хвоя, root — корни, under — подлесок и подрост, gff — живой напочвенный покров.

Для слагаемых правой части уравнения (6) общая продуктивность

Таблица 1

Коэффициенты агрегированных моделей (уравнения 4 и 5) для оценки фитомассы древостоя основных лесобразующих пород России

Порода, № уравнения	Фракция фитомассы	Оценка параметров						R^2	N
		C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5		
Сосна (5)	Ствол	0,2105	0,2126	0,0127	-0,0240	-0,0026	-0,0409	0,15	992
	В т. ч. кора	0,0225	-0,6865	1,5137	-0,1116	0,0035	0,0035	0,56	369
	Ветви	0,3358	-0,7267	0,8726	0,4863	0,0049	-1,0819	0,47	980
	Хвоя	0,0872	-0,9187	1,0143	-0,4789	0,0035	0,4092	0,20	1045
	Корни	0,2303	-0,1487	0,2689	0,8118	0,00004	-0,5626	0,18	543
Лиственница (5)	Ствол	0,3387	0,0766	0,0364	-0,0825	-0,0006	0,0508	0,13	271
	В т. ч. кора	0,0311	-0,0289	0,6192	0,0036	-0,0004	-0,1444	0,38	201
	Ветви	0,5197	-0,9132	0,7981	-0,2485	0,0051	-0,3437	0,34	273
	Хвоя	0,0812	-0,9576	0,7698	-0,5758	0,0043	0,5305	0,42	273
	Корни	0,0450	-0,2149	0,8342	-0,6664	0,0009	0,4961	0,39	63
Ель (5)	Ствол	0,2106	0,0132	0,1798	-0,1594	0,0004	0,2092	0,15	324
	В т. ч. кора	0,0441	-0,3091	0,6257	-0,1961	0,0017	0,0354	0,28	111
	Ветви	0,1567	-0,6975	1,1094	-0,0761	0,0028	-0,2352	0,58	368
	Хвоя	1,1287	-0,8163	1,2148	1,8073	0,0010	-1,9600	0,48	370
	Корни	0,4109	-0,0923	0,6929	0,8043	0,0004	-2,0952	0,33	90
Пихта (5)	Ствол	0,3191	-0,2276	0,2834	-0,3283	0,0028	0,2785	0,08	110
	В т. ч. кора	0,2480	-0,5023	0,2377	0,0848	0,0043	-0,3596	0,19	80
	Ветви	0,4651	-1,3997	1,3166	-0,5024	0,0130	0,2107	0,31	108
	Хвоя	0,0272	-0,5720	1,0133	-0,7372	0,0027	0,4282	0,21	116
	Корни	0,0406	-1,0311	1,3670	-1,1220	0,0103	1,5004	0,48	27
Кедр (5)	Ствол	0,2377	0,2057	0,0834	0,1842	-0,0018	-0,3556	0,17	108
	В т. ч. кора	0,1872	-0,2961	0,4769	0,6700	0,0008	-0,9415	0,40	71
	Ветви	0,1077	-0,3139	0,8116	-0,0276	-0,0009	-0,7577	0,54	111
	Хвоя	0,4251	-0,7082	0,9321	0,3271	-0,0010	-1,2715	0,73	112
	Корни	0,6517	-0,3384	0,4001	0,5589	0,0008	-1,1526	0,42	63
Береза (5)	Ствол	0,5723	0,0758	-0,1380	-0,0963	-0,0012	-0,0082	0,11	294
	В т. ч. кора	0,2745	-0,0736	0,1846	0,7484	-0,0033	-0,9161	0,29	182
	Ветви	0,1711	-0,4183	0,3116	-0,4016	0,0068	0,0022	0,19	353
	Листва	0,0573	-0,9851	0,9432	-0,9587	0,0058	0,6670	0,62	354
	Корни	0,2269	-0,4855	1,0823	0,4208	0,0014	-0,6277	0,63	91
Осина (5)	Ствол	0,5422	0,0034	-0,1751	-0,1564	-0,0002	0,0871	0,09	161
	В т. ч. кора	0,1701	-0,4419	0,6504	0,3477	0,0023	-0,6150	0,45	115
	Ветви	0,0676	-0,4346	0,4581	-0,6986	0,0055	0,4873	0,27	172
	Листва	0,0558	-0,9017	0,3306	-1,8630	-0,0037	1,3707	0,88	178
	Корни	1,0694	-0,3372	0,2435	0,7394	0,0007	-1,1848	0,61	63
Дуб (4)	Ствол	0,5592	-0,0750	0,0147	0,0498	-0,0179	—	0,13	132
	В т. ч. кора	0,0198	0,8194	-0,0136	-0,0064	-0,0100	—	0,92	9
	Ветви	0,0412	1,2960	-0,3601	0,2965	-0,2957	—	0,57	138
	Листва	0,0732	1,4000	-0,9009	-0,2543	0,1165	—	0,90	143
	Корни	0,3169	0,8309	-0,3548	-0,1896	0,0964	—	0,77	19
Ольха (4)	Ствол	0,2090	0,4518	-0,0021	0,0579	-0,0710	—	0,54	27
	Ветви	0,0595	0,5284	0,0276	-0,3683	0,0174	—	0,47	26
	Листва	0,0358	1,4091	-1,6714	0,9653	-0,4070	—	0,97	26
	Корни	0,0245	0,9681	0,1015	-0,0776	-0,0667	—	0,91	10
	Ствол	0,6757	0,1220	0,0893	0,5175	-0,0016	-0,6244	0,95	17
Бук (5)	Ветви	0,0695	-0,5938	0,2541	-1,8871	0,0094	1,8350	0,69	22
	Листва	70,2155	-1,6062	1,6218	4,3308	0,0206	-5,9753	0,96	19

Коэффициенты агрегированных моделей (уравнение 5) для оценки фитомассы нижних ярусов леса

Фракция фитомассы	Порода	Оценка параметров					R ²	N	
		C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄			C ₅
Подрост и подлесок	Сосна	0,0977	1,2007	-0,6428	0,3967	-0,0041	-1,2726	0,27	104
	Лиственница	0,0005	2,2190	-0,9409	-0,7964	-0,0075	0,2050	0,35	91
	Темнохвойные	0,0007	2,9234	-0,9569	0,3560	-0,0188	-2,2670	0,47	97
Живой напочвенный покров	Лиственные	0,0020	1,7174	0,7281	0,1892	-0,0102	-0,6804	0,65	37
	Сосна	0,1500	0,8441	0,3496	0,0636	-0,0030	-0,9200	0,38	157
	Лиственница	0,1103	0,1646	2,1700	0,9692	0,0009	-2,9794	0,36	115
	Темнохвойные	0,0025	2,0397	2,3526	3,7123	-0,0121	-7,1858	0,70	132
	Лиственные	0,4529	0,4664	0,5579	0,0064	-0,0023	-1,0993	0,56	48

Фитомассы отдельных фракций определяется по формулам (7)–(14).

Продуктивность стволовой древесины (принимая Rⁱ одинаковым для наличного древостоя и отпада) равна

$$TPF_A^{st} = \sum_{A=1}^A [(TV_A - TV_{A-1})R^{st}], \quad (7)$$

включая кору

$$TPF_A^{bark} = \sum_{A=1}^A [(TV_A - TV_{A-1})R^{bark}]; \quad (8)$$

скелета кроны (ветвей) —

$$TPF_A^{br} = \sum_{A=1}^A [(TV_A - TV_{A-1})R^{br} + vF_{A-1}^{br}], \quad (9)$$

где коэффициент v отражает потери древесины кроны живых деревьев (отмирание ветвей, повреждения насекомыми и ветром и т. д.).

Продуктивность листьев и хвои —

$$TPF_A^{fol} = \sum_{A=1}^A [(F_A^{fol} - F_{A-1}^{fol}) + (TPF_{A-1}^{fol} - TPF_{A-1-1}^{fol}) + (1 + \frac{v}{q})F_{A-1}^{fol} + \frac{\eta}{2k}[(TV_A - GS_A) - (TV_{A-1} - GS_{A-1})]R_{A-1}^{fol}]. \quad (10)$$

В уравнениях (7)–(10) TV и GS — соответственно общая продуктивность и наличный запас древостоя. В выражении (10) первое слагаемое учитывает изменение запаса листьев (хвои), второе — вновь образовавшуюся хвою взамен опадающей, предполагая, что в текущем году опадает вся хвоя, образовавшаяся 1 лет назад (1 — средний срок жизни хвои), третье — потерю живой хвои (поедание насекомыми, механические повреждения и т. д.), что учитывается коэффициентом v; четвертое — хвою, произведенную деревьями текущего отпада. Сумма первых двух слагаемых всегда больше или равна нулю. Другие обозначения в формуле (10) таковы: η — период года, когда насаждение имеет ассимиляционный аппарат (для вечнозеленых η=1); 2 — поправка на срок (полгода), в течение которого происходит неучтенное отмирание деревьев, т. е. если потеря случается после проведения учета (середина сезона), то второй раз ее учитывать не надо; q — поправка на срок, в который происходит потеря ассимиляционного аппарата (для листопадных пород она равна 2, для вечнозеленых — 1, т. е. если учет листьев осуществлен в середине сезона, то все, что было потеряно позже, не имеет значения для продуктивности — вся листва опадает в конце года; для вечнозеленых пород потеря во второй половине года восполняется приростом следующего года и поэтому должна быть учтена); k — поправка на продуцирующую способность отмирающих деревьев. Для полных насаждений, где отмирание связано с естественными причинами, k=3, для модальных насаждений, где возможен отпад жизнеспособных деревьев, k=1,5.

Выражение для корней имеет следующий вид:

$$TPF_A^{f_root} = \sum_{A=1}^A [Pc^{f_root}(F_A^{root} - F_{A-1}^{root}) + (TPF_{A-1}^{f_root} - TPF_{A-1-1}^{f_root}) + vF_{A-1}^{f_root} + \frac{Pc^{f_root}}{2k}[(TV_A - GS_A) - (TV_{A-1} - GS_{A-1})]R_{A-1}^{root}], \quad (11)$$

$$TPF_A^{root} = TPF_A^{f_root} + (1 - Pc^{f_root})TV_A R_A^{root}, \quad (12)$$

где TPF^{f_root} и TPF^{root} — соответственно общая продуктивность фитомассы тонких (до 2 мм) и всех корней. Первое слагаемое в уравнении (11) учитывает изменение запаса корней живых деревьев, второе — вновь образовавшиеся тонкие корни вместо отмерших, третье — потерю тонких корней (насекомые, животные), четвертое — вновь появившиеся тонкие корни, отмирающие в текущем году. Pc^{f_root} — доля тонких корней по отношению ко всем живым. Коэффициенты k, 1 и v уравнения (11) имеют аналогию с уравнением (10) применительно к тонким корням. Наконец, (TV_A - GS_A) - (TV_{A-1} - GS_{A-1}) и (TV_A - GS_A) представляют собой отпад стволовой древесины за год A и за всю жизнь древостоя до возраста A.

Общая продуктивность фитомассы подроста и подлеска равна

$$TPF_A^{under} = \sum_{A=1}^A [(F_A^{under} - F_{A-1}^{under}) + \xi^{under} F_{A-1}^{under}], \quad (13)$$

живого напочвенного покрова —

$$TPF_A^{gff} = \sum_{A=1}^A [(F_A^{gff} - F_{A-1}^{gff}) + \xi^{gff} F_{A-1}^{gff}], \quad (14)$$

где ξ^{under} и ξ^{gff} — суммарный годичный отпад зеленых частей и тонких корней для подроста и подлеска, а также живого напочвенного покрова.

Коэффициенты, использованные в приведенных выше формулах, получены на основе анализа и обобщения опубликованных материалов. Как правило, использовались доступные данные измерений для всей циркумполярной бореальной и умеренной зоны, поскольку по некоторым показателям данные, собранные на территории России, крайне малочисленны. В частности, для оценки продолжительности жизни тонких корней (или обратной величины, обычно называемой кругооборотом тонких корней) собранная нами база включала всего 220 измерений для всех умеренных и бореальных лесов мира [5 и др.]. Это привело к необходимости использования в весьма ограниченных случаях оценок по аналогии со сходными лесами других территорий. В табл. 3 в качестве примера приведены коэффициенты, использованные для разработки МБП лиственницы.

Таблица 3

Коэффициенты, использованные при разработке региональных моделей биопродуктивности для насаждений лиственницы

Область применения таблиц биопродуктивности	Часть года с наличным хвоем	Срок жизни тонких корней, лет	Часть года с наличным хвоем			
			ветви	хвоя	подрост, подлесок	живой напочвенный покров
Полные (нормальные) насаждения						
Лесные культуры европейской части	0,35	1,5	0,015	0,08	0,3	0,5
Горные экорегионы Западной Сибири	0,32	2,5	0,01	0,06	0,3	0,4
Центральная Сибирь	0,32	3	0,01	0,04	0,2	0,3
Бурятия и Иркутская обл.	0,32	3	0,01	0,06	0,2	0,3
Северо-Восточная Якутия	0,27	4	0,01	0,04	0,15	0,2
Центральная и южная Якутия	0,3	3,5	0,01	0,04	0,2	0,2
Юг Дальнего Востока	0,34	2,5	0,015	0,08	0,2	0,3
Модальные насаждения						
Енисейский край	0,32	3	0,01	0,06	0,2	0,3
Бассейн Ангары	0,32	3	0,01	0,06	0,2	0,3
Прибайкалье и бассейн Лены	0,32	3	0,01	0,06	0,2	0,3
Забайкалье	0,32	3	0,01	0,06	0,2	0,3
Центральная и северная Якутия	0,29	4	0,01	0,04	0,2	0,2
Южная Якутия, дренированные ТУМ	0,3	3,5	0,01	0,05	0,2	0,3
Южная Якутия, переувлажненные ТУМ	0,3	3,5	0,01	0,05	0,2	0,2
Магаданская обл. и северо-восток Якутии	0,27	4	0,01	0,04	0,15	0,2
Южная часть Дальнего Востока	0,35	2,5	0,015	0,07	0,2	0,3
Побережье Охотского моря	0,3	3,5	0,01	0,05	0,25	0,2

Сходные проблемы с параметризацией уравнений возникали и при оценке доли тонких корней (отношение массы тонких корней к фитомассе всех корней древостоя). Как правило, использовались зависимости процента тонких корней от возраста и класса бонитета. Например, для лиственницы применена модель

$$PC_{A,SI}^{fine_roots} = 0,000223 A^2 - 0,11524 A + 26,90905 - \frac{12}{i-si+5} [-0,75 \sum_{i=si+1}^{S+1} (1+0,002A)]$$

где класс бонитета закодирован (4, 5, ... для Ib, Ia, ... и т. д.).

Модель использует следующие, подтвержденные результатами измерений гипотезы: процент тонких корней убывает с возрастом; доля тонких корней в низкопродуктивных насаждениях выше, чем в высокопродуктивных; различие между классами бонитетов непостоянно и уменьшается с улучшением условий роста (для одинаковых возрастов); различия между классами бонитетов уменьшаются с возрастом.

Примеры таблиц биологической продуктивности и облусбуждения. Описанная методика оказалась приемлемой для разработки таблиц биологической продуктивности для всех ТХР, включенных в систему [4]. Табл. 4 и

5 в качестве примера содержат общие показатели биологической продуктивности сосновых насаждений для III класса бонитета и модальных лиственничников южной Якутии IV класса бонитета. Соответствующие ТХР представлены в предыдущей работе [4]. По-видимому, показатели, приведенные в табл. 4 и 5, дополнительных объяснений не требуют. Заметим только, что текущий прирост, указанный в единицах массы углерода (последняя колонка), представляет собой чистую первичную продукцию экосистемы, выраженную в г С/м² в год для каждого возраста древостоя.

Разработанные МБП содержат обширнейшую концентрированную информацию о биологической продуктивности насаждений различных пород, регионов, групп типов леса. К сожалению, ее исчерпывающий анализ невозможен в журнальной статье. Читатель может самостоятельно проанализировать соотношение между величинами и динамикой фракций фитомассы, приведенными в табл. 4 и 5. Обратим только внимание на то, что, например, накопленная за 200 лет лиственничной экосистемой NPP (1221,5 т сухого вещества, табл. 5) более чем на 3/4 обусловлена продукцией зеленых частей и тонких корней (эти и многие другие результаты в таблице отсутствуют, но они содержатся в электронной версии системы).

В целях иллюстрации рассмотрим один дополнительный пример. На рис. 1–3 графически изображены некоторые основные зависимости МБП модальных лиственничников южной Якутии (экорегions)

Таблица 4

Динамика биологической продуктивности полных (нормальных) сосновых древостоях

Возраст, лет	Фитомасса насаждения, т/га							Общая продуктивность фитомассы, т/га	Текущий прирост фитомассы, т/га/год		Углерод, т/га		Текущий прирост углерода, г/м ² /год
	ствол (в т. ч. кора)	древесина кроны	хвоя	корни	подрост и подлесок	живой напочвенный покров	всего (насаждение)		наличного насаждения	по общей продуктивности	наличного насаждения (в т. ч. ствол)	по общей продуктивности (в т. ч. ствол)	
III класс бонитета													
10	5,5 (1,9)	2,3	2,1	2,7	0,1	0,8	13,5	21,8	2,13	3,54	6,7 (2,8)	10,6 (3,8)	146
20	20,3 (3,9)	4,8	4,0	8,0	0,2	1,5	38,8	72,1	2,80	5,77	19,1 (10,1)	35,0 (13,5)	243
30	39,9 (5,7)	6,9	5,3	14,0	0,4	2,0	68,5	141,0	3,05	7,22	33,9 (20,0)	68,5 (27,0)	309
40	61,1 (7,2)	8,7	6,3	19,8	0,5	2,5	98,9	221,7	2,98	8,12	48,9 (30,5)	107,6 (42,4)	352
50	81,6 (8,3)	10,1	6,9	25,1	0,6	2,9	127,2	309,5	2,73	8,61	63,1 (40,8)	150,1 (58,3)	377
60	100,4 (9,2)	11,3	7,4	29,6	0,8	3,3	152,8	400,9	2,40	8,84	75,8 (50,2)	194,3 (73,9)	391
70	116,9 (10,0)	12,3	7,6	33,5	0,9	3,6	174,8	493,7	2,04	8,89	86,8 (58,4)	239,0 (88,5)	396
80	130,8 (10,5)	13,1	7,8	36,7	1,0	3,9	193,3	586,6	1,70	8,83	96,1 (65,4)	283,7 (101,9)	396
90	142,4 (10,9)	13,7	7,9	39,3	1,1	4,2	208,6	678,6	1,39	8,71	103,7 (71,2)	327,8 (114,0)	393
100	151,6 (11,3)	14,3	8,0	41,4	1,2	4,5	221,0	769,1	1,11	8,55	109,8 (75,8)	371,1 (124,7)	388
110	158,9 (11,5)	14,8	8,0	43,0	1,3	4,7	230,7	858,1	0,87	8,39	114,7 (79,5)	413,6 (134,1)	383
120	164,5 (11,7)	15,2	7,9	44,3	1,4	4,9	238,2	945,4	0,66	8,22	118,4 (82,2)	455,2 (142,2)	377
130	168,5 (11,9)	15,6	7,9	45,3	1,5	5,1	243,9	1031,0	0,49	8,06	121,2 (84,3)	496,0 (149,3)	371
140	171,3 (12,0)	15,9	7,9	46,0	1,5	5,3	247,9	1115,1	0,34	7,91	123,2 (85,7)	535,9 (155,3)	365
150	173,1 (12,1)	16,2	7,8	46,5	1,6	5,4	250,6	1197,8	0,22	7,78	124,6 (86,5)	575,1 (160,4)	361
160	173,9 (12,2)	16,5	7,7	46,9	1,7	5,6	252,3	1279,2	0,13	7,67	125,4 (87,0)	613,6 (164,8)	356
170	174,0 (12,3)	16,9	7,7	47,2	1,7	5,7	253,2	1359,6	0,05	7,57	125,8 (87,0)	651,6 (168,5)	352
180	173,6 (12,4)	17,2	7,6	47,3	1,8	5,8	253,3	1438,9	-0,02	7,48	125,9 (86,8)	689,1 (171,7)	349
190	172,6 (12,5)	17,5	7,6	47,4	1,8	5,9	252,8	1517,5	-0,07	7,41	125,6 (86,3)	726,1 (174,3)	346
200	171,3 (12,5)	17,8	7,6	47,4	1,8	5,9	251,8	1595,3	-0,11	7,34	125,2 (85,7)	762,8 (176,6)	344

Таблица 5

Динамика биологической продуктивности модальных лиственничников экорегions средней тайги южной Якутии (брусничниковые типы леса)

Возраст, лет	Фитомасса насаждения, т/га							Общая продуктивность фитомассы, т/га	Текущий прирост фитомассы, т/га/год		Углерод, т/га		Текущий прирост углерода, г/м ² /год
	ствол (в т. ч. кора)	древесина кроны	хвоя	корни	подрост и подлесок	живой напочвенный покров	всего (насаждение)		наличного насаждения	по общей продуктивности	наличного насаждения (в т. ч. ствол)	по общей продуктивности (в т. ч. ствол)	
IV класс бонитета													
40	39,8 (7,5)	7,6	2,1	17,6	0,2	1,6	68,9	152,0	2,17	6,36	34,2 (19,9)	72,9 (21,8)	272
50	53,3 (9,8)	8,7	2,3	22,4	0,3	1,6	88,6	219,2	1,83	6,74	44,2 (26,7)	105,1 (31,0)	292
60	64,9 (11,8)	9,5	2,5	26,5	0,5	1,8	105,7	289,4	1,54	6,94	52,6 (32,5)	138,6 (39,6)	302
70	74,2 (13,3)	10,1	2,5	29,7	0,6	2,0	119,1	360,3	1,22	6,93	59,4 (37,1)	172,3 (47,3)	305
80	81,5 (14,5)	10,6	2,6	32,2	0,8	2,2	129,9	430,7	0,95	6,85	64,7 (40,8)	205,8 (53,8)	303
90	87,1 (15,4)	10,9	2,6	34,2	1,0	2,4	138,2	500,2	0,74	6,76	68,8 (43,6)	238,7 (59,3)	301
100	91,4 (16,0)	11,2	2,6	35,8	1,3	2,7	145,0	568,8	0,59	6,68	72,1 (45,7)	271,1 (63,7)	298
110	94,5 (16,5)	11,3	2,5	36,8	1,5	2,8	149,4	635,9	0,41	6,52	74,4 (47,2)	302,8 (67,2)	294
120	96,7 (16,8)	11,4	2,5	37,7	1,7	3,0	153,0	702,1	0,32	6,45	76,1 (48,4)	333,9 (70,1)	292
130	98,4 (17,0)	11,5	2,5	38,4	1,9	3,2	155,9	767,7	0,26	6,40	77,6 (49,2)	364,7 (72,3)	291
140	99,6 (17,1)	11,6	2,4	39,0	2,1	3,3	158,0	832,9	0,22	6,39	78,7 (49,8)	395,3 (74,1)	291
150	100,5 (17,2)	11,7	2,4	39,7	2,4	3,5	160,2	898,2	0,19	6,40	79,7 (50,3)	425,9 (75,4)	292
160	100,2 (17,0)	11,7	2,4	39,6	2,6	3,6	160,1	962,9	-0,02	6,33	79,6 (50,1)	456,2 (76,5)	291
170	99,6 (16,9)	11,7	2,4	39,6	2,8	3,8	159,9	1027,4	-0,03	6,33	79,5 (49,8)	486,3 (77,3)	291
180	98,9 (16,7)	11,7	2,3	39,5	3,0	3,9	159,3	1091,9	-0,05	6,34	79,3 (49,5)	516,4 (78,0)	291
190	98,1 (16,5)	11,8	2,3	39,4	3,2	4,0	158,8	1156,6	-0,07	6,36	78,9 (49,0)	546,6 (78,5)	292
200	97,0 (16,3)	11,8	2,3	39,3	3,3	4,1	157,8	1221,5	-0,10	6,39	78,5 (48,5)	576,9 (78,8)	294
210	95,6 (16,0)	11,7	2,2	38,8	3,4	4,2	155,9	1285,8	-0,20	6,31	77,6 (47,8)	606,9 (79,1)	293
220	94,0 (15,7)	11,7	2,2	38,2	3,5	4,3	153,9	1349,9	-0,24	6,29	76,5 (47,0)	636,7 (79,4)	292

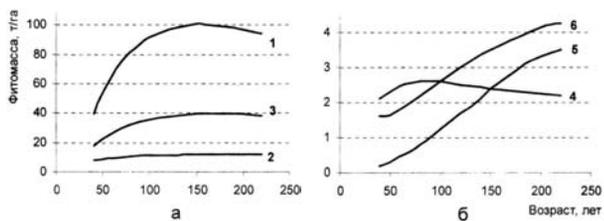


Рис. 1. Изменение наличной фитомассы лиственных насаждений южной Якутии (средняя тайга, брусничниковые типы леса) IV класса бонитета с возрастом по фракциям: 1 — ствол, 2 — ветви, 3 — корни (а); 4 — хвоя, 5 — подрост и подлесок, 6 — живой напочвенный покров (б)

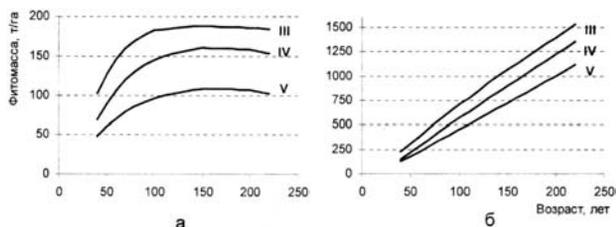


Рис. 2. Изменение наличной фитомассы (а) и общей продуктивности фитомассы (б) с возрастом в зависимости от класса бонитета насаждения

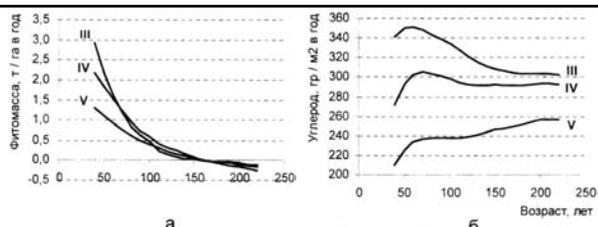


Рис. 3. Зависимость прироста наличной фитомассы (а) и прироста по общей продуктивности фитомассы — чистой первичной продукции (б) от возраста и класса бонитета

средней тайги, брусничниковые типы леса) для III—V классов бонитета. Запасы хвой достигают своего максимума в 80 лет, а после 110-летнего возраста плавно снижаются (см. рис. 1). Вслед за началом разрушения насаждения (в возрасте 150 лет) идет снижение запасов фитомассы за счет фракций ствола и корней. Фитомасса ветвей продолжает увеличиваться до 190 лет. Нижние ярусы наращивают свою массу в течение всей жизни древостоя. Насаждения III класса бонитета имеют максимальный прирост по наличной фитомассе в молодом возрасте, затем в возрасте спелости уступают первенство IV классу бонитета (см. рис. 2,а, 3,а). Однако на стадии разрушения у них наименьшее снижение продуктивности по сравнению с другими классами бонитета. Общая продуктивность насаждения постоянно возрастает на протя-

жении всей жизни древостоя (см. рис. 2,б). Прирост по общей продуктивности имеет максимум у III и IV классов бонитета — соответственно в 60 и 70 лет (см. рис. 3,б), в то время как у V класса бонитета он продолжает увеличиваться с некоторыми колебаниями до 220 лет. Это объясняется лучшим развитием нижних ярусов леса и возрастанием доли хвой в структуре фитомассы с ухудшением условий произрастания.

Преимущество реализованного подхода состоит в том, что моделирование биологической продуктивности представляет собой динамическую и в определенном смысле «самообучающуюся» систему: возможно постоянное обновление как промежуточных результатов (например, моделей фитомассы при наличии дополнительного экспериментального материала), так и самих МБП с заменой матрицы коэффициентов по мере накопления новой эмпирической информации. При появлении новых ТХР вычисление соответствующих МБП может производиться в автоматическом режиме, хотя содержательный анализ промежуточных и окончательных результатов необходим.

Качество МБП определяется надежностью ТХР и точностью моделей фитомассы. Существующие таблицы не принадлежат к числу лесотаксационных нормативов, точность которых может быть оценена формальным путем. Более определенный ответ может быть дан относительно моделей фитомассы, хотя и при разработке последних важные статистические предпосылки не выполняются (например, территориальное распределение экспериментальных данных). Оценивание фитомассы и биологической продуктивности для различных объектов (отдельное насаждение, лесной массив, экорегионы леса страны в целом) представляют собой типичную нечеткую (fuzzy) задачу, что предъявляет специфические требования к процессу оценки точности. Тем не менее рассмотренный выше подход позволяет оценить общую фитомассу на больших территориях (начиная с уровня лесхоза) с погрешностью $\pm 5\%$ (доверительная вероятность — 0,9), если используемые в качестве входов в модели таксационные показатели являются несмещенными (или величина смещения известна) [3].

Разработанная система роста и динамики продуктивности лесов России имеет большое значение для дальнейшего развития методических и модельных основ лесной таксации. Очень важно, что в системе собрана в аккумулированном и формально упорядоченном виде гигантская информация, накопленная многими поколениями российских таксаторов. Эта информация впервые становится доступной для лесотаксационной науки и практики в удобной «операциональной» форме — допускаются изменения и усовершенствования любого норматива (будь то вследствие появления нового знания или изменения требований) программным путем. Наконец, система является информационной и модельной основой для разработки многих иных нормативов — стандартных таблиц сумм площадей сечений и запасов, моделей текущего прироста и т. д.

Список литературы

1. Усольцев В. А. Формирование банков данных о фитомассе лесов. Екатеринбург, 1998. 541 с.
2. Усольцев В. А. Фитомасса лесов Северной Евразии. База данных и география. Екатеринбург, 2001. 707 с.
3. Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г., Нильссон С. Агрегированные модели фитомассы насаждений основных лесобразующих пород России // Лесная таксация и лесостроительство. 2001. № 1. С. 50—57.
4. Швиденко А. З., Щепаченко Д. Г., Нильссон С., Булуй Ю. И. Система моделей роста и динамики продуктивности лесов России. Таблицы хода роста // Лесное хозяйство. 2003. № 6. С. 34—38.
5. Gill R. A., Jackson R. B. Global Patterns of Root Turnover for Terrestrial Ecosystems // New Phytologist. 2000. Vol. 147. P. 13—31.